

**Martin VAVRO<sup>1</sup>, Jana BOHÁČOVÁ<sup>2</sup>, Pavel MEC<sup>3</sup>, Václava TOMKOVÁ<sup>4</sup>, Jozef VLČEK<sup>5</sup>,  
Stanislav STANĚK<sup>6</sup>**

**ALKALICKY AKTIVOVANÉ STAVEBNÍ HMOTY NA BÁZI VYSOKOPECNÍ STRUSKY  
A NESTANDARDNÍHO KAMENIVA**

**ALKALI-ACTIVATED BUILDING MATERIALS BASED ON BLAST FURNACE SLAG  
AND NON-STANDARD AGGREGATES**

**Abstrakt**

Příspěvek se zabývá alkalicky aktivovanými materiály na bázi jemně mleté granulované vysokopecní strusky. Současně jsou v těchto hmotách jako plnivo použity odpadní suroviny jak z výroby a úpravy stavebních surovin a hmot, tak také z oblasti demolice staveb. Vytvořený materiál je testován na mechanické a trvanlivostní parametry. Výsledky mohou přispět k dalšímu výzkumu a vývoji alkalicky aktivovaných systémů se zaměřením na praktické využití ve stavebnictví.

**Klíčová slova**

Alkalicky aktivované materiály, granulovaná vysokopecní struska, odpadní suroviny, fyzikální a mechanické vlastnosti stavebních hmot.

**Abstract**

This paper deals with alkali activated materials based on fine grained granulated blast furnace slag. Waste aggregates from building materials and building demolition are used as the filler. Material is tested on mechanical and durability parameters. Results may contribute to next alkali activated system development and research focused on practical application in building industry.

**Keywords**

Alkali activated materials, blast furnace slag, waste materials, physical and mechanical properties of building materials.

---

<sup>1</sup> Ing. Martin Vavro, Ph.D., Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321382, e-mail: martin.vavro@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Jana Boháčová, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321968, e-mail: jana.bohacova@vsb.cz.

<sup>3</sup> Ing. Pavel Mec, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321952, e-mail: pavel.mec@vsb.cz.

<sup>4</sup> Doc. Ing. Václava Tomková, CSc., Katedra tepelné techniky, Ústav průmyslové keramiky, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321607, e-mail: vaclava.tomkova@vsb.cz.

<sup>5</sup> Doc. Ing. Jozef Vlček, Ph.D., Katedra tepelné techniky, Ústav průmyslové keramiky, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321523, e-mail: jozef.vlcek@vsb.cz.

<sup>6</sup> Ing. Stanislav Staněk, Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321968, e-mail: stanislav.stanek.st@vsb.cz.

# 1 ÚVOD

Alkalicky aktivované materiály, resp. geopolymery představují specifickou skupinu anorganických bezcementových hmot. Vznikají reakcí latentně hydraulických látek nebo pucolánů (granulovaná struska, popílek, metakaolín) s vhodným aktivátorem. Jako aktivátory lze použít roztoky rozpustných sloučenin alkalických kovů, především sodných a draselných, konkrétně uhličitánů, hydroxidů nebo křemičitanů [6]. Produktem této aktivace jsou hydraulická pojiva, která, po přidávku vody, jsou využitelná pro tvorbu kompozitních látek výborných užitných vlastností [7]. Alkalicky aktivované materiály mohou prakticky sloužit jako alternativy klasických stavebních hmot, zejména cementového betonu, ale díky svým parametrům se mohou uplatnit v řadě ostatních oborů (např. při restaurování památek apod.). Především ve stavebnictví je ale jejich potenciál v současnosti využit jen ve sporadickém měřítku, a to přesto, že výzkumy alkalicky aktivovaných materiálů probíhají již od šedesátých let minulého století.

Nespornou výhodou použití alkalicky aktivovaných materiálů jsou jejich ekonomické a ekologické přednosti. V těchto materiálech se totiž mohou významně zhodnotit druhotné suroviny, vykazující latentní hydraulicitu nebo pucolánovou aktivitu, především velkoobjemové vedlejší produkty z metalurgie a energetiky. Příprava alkalicky aktivovaných pojiv a kompozitů probíhá za běžných nebo jen málo zvýšených teplot, nevyžaduje předcházející výpal poloproduktů na vysokou teplotu (jako je tomu např. u portlandského slínku), ani zpevňování slinováním za vysokých teplot a omezuje se tedy vznik  $\text{CO}_2$  ze spalovacích procesů a z rozkladu vápence. Předností alkalicky aktivovaných hmot je také možnost širokého využití často nestandardních plniv, která nejsou používána v technologii výroby betonu.

V tomto příspěvku jsou prezentovány základní vlastnosti laboratorně připravených alkalicky aktivovaných kompozitních materiálů na bázi jemně mleté granulované vysokopecní strusky a recyklovaných nebo nestandardních kameniv.

## 2 POUŽITÉ MATERIÁLY

Pro vlastní přípravu vzorků bylo použito několik druhů vstupních surovin. Funkci pojiva tvoří alkalicky aktivovaná jemně mletá granulovaná vysokopecní struska. Aktivace se provedla roztokem vodního skla, jehož silikátový modul byl upraven 50% roztokem hydroxidu sodného na hodnotu  $M_s = 2,0$ . Jako plnivo byl použit jednak normový zkušební písek používaný pro přípravu cementových zkušebních těles při zkoušení pevnosti cementu. Záměs se zkušebním pískem sloužila jako srovnávací (referenční) záměs. V dalších záměsích byly použity nestandardní druhy plniv. Konkrétně se jednalo o cihelný a betonový recyklát, výsivku z výroby kameniva a odpadní písek, vznikající při plavení kaolínu. U všech druhů pojiv byla síťováním upravena granulometrie, a to tak, aby maximální zrno bylo o velikosti 2mm. Následně byly připraveny jednotlivé testované směsi, ve kterých byl normový písek nahrazen 50 nebo 100% nestandardního kameniva. Jednotlivé záměsi byly následně zkoušeny na mechanické a trvanlivostní vlastnosti. Jednotlivé výsledky jsou porovnány s referenčním vzorkem.

### 2.1 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska představuje vedlejší produkt z primární metalurgie železa. Při rychlém ochlazení žhavotekuté hmoty vzniká granulovaná vysokopecní struska, která se vyznačuje latentně hydraulickými vlastnostmi. Pro alkalickou aktivaci latentně hydraulických látek je pak nutnou podmínkou to, aby významné podíly  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v jejich složení byly zastoupeny v nekrystalické, reaktivní formě. Podobně jako při hydrataci portlandských cementů jsou i u alkalicky aktivovaných materiálů nositelem pevnostních parametrů vznikající C-S-H fáze. Pro vlastnosti zatvrdlých alkalicky aktivovaných hmot je však významné, že souběžně nevzniká portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) tak, jak je tomu v případě portlandského cementu.

V experimentu byla použita jemně mletá granulovaná vysokopecní struska SMŠ 380, standardní produkt firmy Kotouč Štramberk, s.r.o.

## 2.2 Aktivátor

Pro aktivaci vysokopecní strusky bylo použito sodné vodní sklo firmy Kittfort. Před samotným použitím aktivátoru byl upraven silikátový modul (poměr  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) vodního skla na hodnotu 2,0. K úpravě silikátového modulu se použilo 50% roztoku hydroxidu sodného.

## 2.3 Cihelný recyklát

Cihelný recyklát byl pro účely experimentu připraven laboratorně, a to podrcením tří kusů plných cihel na laboratorním čelistovém drtiči. Použité cihly pocházejí ze dvou zdrojů – dva kusy jsou „nové“ cihly, zakoupené v obchodní síti, třetí kus pocházel z demolice rodinného domu ve Frýdlantu nad Ostravicí. Před samotným drcením byla u jednotlivých vzorků stanovena pevnost v tlaku. Zjištěné hodnoty pevnosti uvádí tab. 1. Po zdrobnění byl získaný recyklát upraven síťováním na maximální velikost zrna 2 mm.

Tab. 1: Pevnost v tlaku.

Vzorek	Pevnost v prostém tlaku [MPa]
cihla z demolice	29,9
„nová cihla 1“	26,9
„nová cihla 2“	26,1

## 2.4 Betonový recyklát

Betonový recyklát byl připraven rozdrčením několika kusů zkušebních betonových krychlí po provedení zkoušky v tlaku v Laboratoři stavebních hmot Fakulty stavební VŠB – TUO. Všechna použitá zkušební tělesa byla představována prostým cementovým betonem pevnostní třídy C30/37 po 28 dnech zrání. Po zdrobnění byl získaný recyklát opět upraven síťováním na maximální velikost zrna 2mm.

## 2.5 Výsivka

Výsivka představuje kamenivo frakce 0/4 s vysokým obsahem jemných částic, vznikající v procesu úpravy drceného kameniva. Použitá výsivka byla po petrografické stránce představována drobou, vzorek byl odebrán v lomu Bohučovice u Hradce nad Moravicí. Před aplikací tohoto materiálu byla upravena jeho granulometrie tak, že byla odstraněna zrna nad 2 mm.

## 2.6 Odpadní písek z plavení kaolínu

Odpadní (resp. „sekundární“) písek představuje drobné kamenivo o velikosti zrn 0 – 4 mm, které vzniká při procesu úpravy kaolínu plavením. Z hlediska mineralogického složení je tento písek tvořen zejména křemenem, živci, slídami (muskovit > biotit), zbytkovým kaolinitem, v menší míře limonitem (goethitem), anatasem a blíže neidentifikovaným karbonátem. V současnosti se jedná o jen málo využívaný přírodní materiál, který je většinou deponován ve vytěžených prostorách povrchových těžeben. U tohoto písku byla rovněž upravena zrnitost odstraněním zrn nad 2 mm.

## 3 RECEPTURY SMĚSÍ A ZKOUŠENÉ VLASTNOSTI

Pro účely laboratorního testování alkalicky aktivovaných hmot s obsahem recyklátů a odpadních kameniv bylo připraveno celkem 9 záměsí, jejichž receptury jsou uvedeny v tab.2. Receptura s označením Z1 představuje referenční směs se 100 % zkušebního křemenného písku ve formě plniva. U směsí Z1A – Z1D bylo 50 % zkušebního písku nahrazeno nestandardním kamenivem a směsi Z1E – Z1H obsahovaly pouze nestandardní kamenivo jako plnivo. Pro většinu zkoušek bylo využito normových postupů pro zkoušení malt či betonů. Zkušební tělesa měla rozměr

40x40x160mm [1]. Vzhledem k rozdílné objemové hmotnosti normového písku a použitých odpadních surovin byly tyto dávkovány objemově. Čerstvé záměsi byly upraveny na jednotnou konzistenci 200 mm, měřenou metodou rozlití [2].

Tab. 2: Receptury alkalicky aktivovaných směsí.

Vzorek	Struska [g]	Zkušební písek [g]	Aktivátor[ml]	Cihelný recyklát [g]	Betonový recyklát [g]	Výsivka [g]	Písek z plavení kaolínu [g]
Z1	450	1350	127	-	-	-	-
Z1A	450	675	127	482	-	-	-
Z1B	450	675	127	-	597	-	-
Z1C	450	675	127	-	-	580	-
Z1D	450	675	127	-	-	-	603
Z1E	225	-	127	964	-	-	-
Z1F	225	-	127	-	1195	-	-
Z1G	225	-	127	-	-	1160	-
Z1H	225	-	127	-	-	-	1206

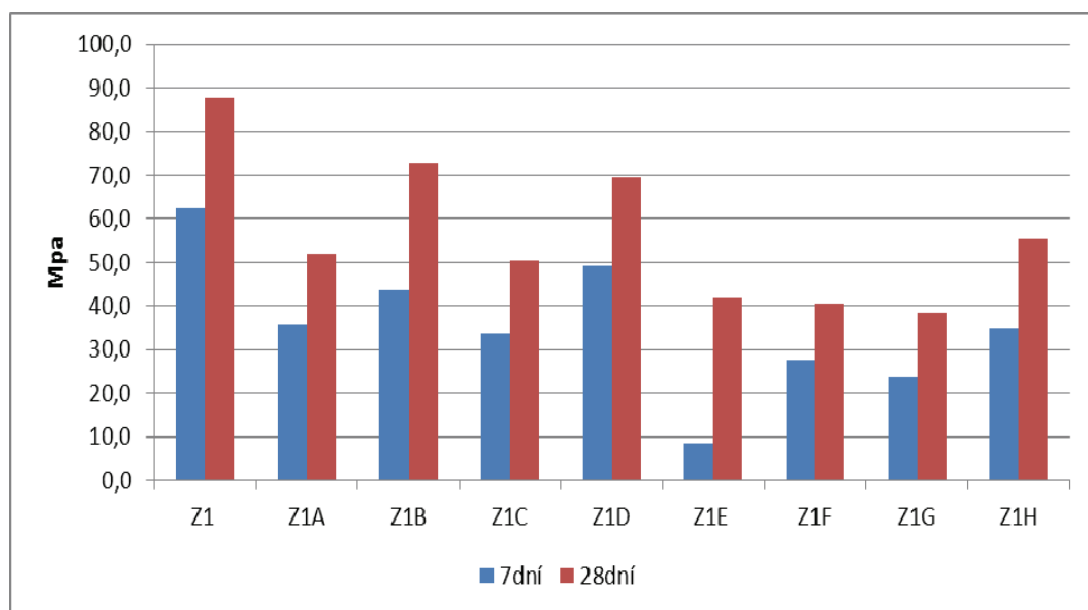
Na připravených vzorcích byla zkoušena pevnost v tlaku a v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech [3]. Z odolnostních zkoušek se prováděly zkoušky mrazuvzdornosti a zkouška odolnosti vůči působení vody a chemických rozmrazovacích látek (CHRL) [4, 5]. Provedena byla také zkouška odolnosti vůči působení kyselin. Při této zkoušce byly vzorky, vyrobené z jednotlivých směsí, po 28 dnech ponořeny na 7 dní do 3% roztoku kyseliny chlorovodíkové. Následně se na těchto zkušebních tělesech zkoušela pevnost v tlaku a tahu za ohybu. V neposlední řadě byla také testována odolnost proti působení vysokých teplot. Příslušné vzorky byly vypáleny v komorové peci na teplotu 800 °C po dobu 2 hodin a následně po vychlazení byla zkoušena na pevnost v tahu za ohybu a v tlaku.

#### 4 VÝSLEDKY ZKOUŠEK

Jednotlivé zkoušky byly prováděny vždy na třech zkušebních tělesech, z dílčích výsledků byl pak následně vypočten aritmetický průměr. Výsledky stanovení pevnostních parametrů, mrazuvzdornosti, odolnosti vůči CHRL a působení kyselin a vysokých teplot jsou prezentovány v tab. 3 a 4 a na obr. 1 – 5.

Tab. 3: Pevnost v tahu za ohybu a v prostém tlaku po 7 a 28 dnech

Vzorek	Pevnost v tahu za ohybu po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu po 28 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 7 dnech [MPa]	Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]
Z1	8,1	9,9	62,3	87,8
Z1A	4,9	7,5	35,5	52,0
Z1B	5,8	7,4	43,8	72,7
Z1C	5,2	5,5	33,9	50,5
Z1D	7,4	6,9	49,3	69,7
Z1E	2,7	5,0	8,5	41,7
Z1F	5,1	5,2	27,6	40,7
Z1G	6,4	6,1	23,5	38,5
Z1H	6,1	7,1	35,0	55,2



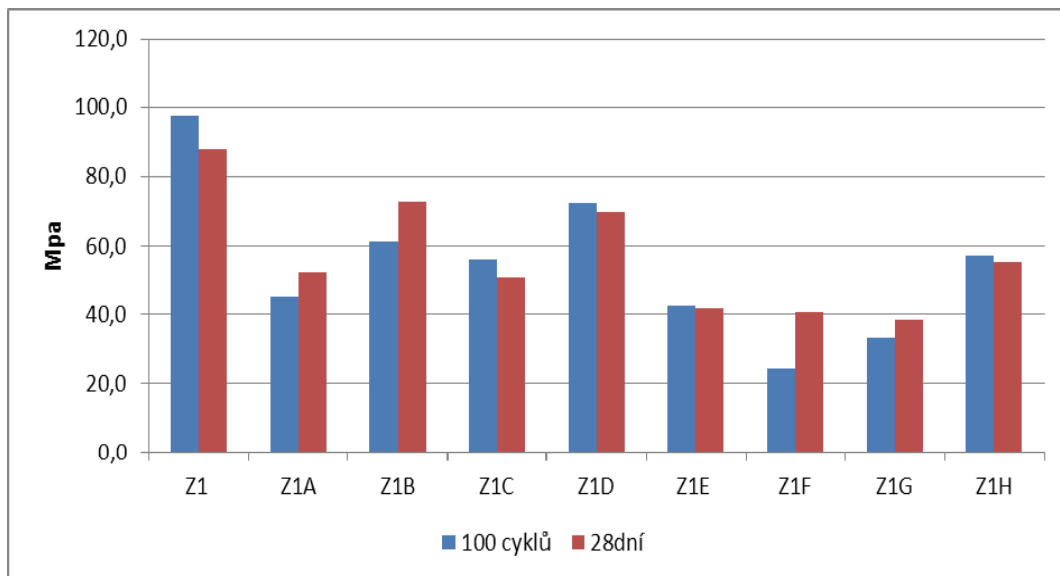
Obr. 1: Vývoj pevnosti v tlaku v závislosti na čase

Výsledky prezentované v tab. 3. a na obr. 1. dokumentují, že nejvyšší pevnosti v tlaku po 28 dnech dosáhla, zcela logicky, referenční směs Z1. Hodnota pevnosti u referenční směsi dosahovala téměř 90 MPa. Je však třeba zdůraznit, že i vzorky z některých směsí s 50% obsahem nestandardních kameniv (Z1B s betonovým recyklátem a Z1D s odpadním pískem z plavení kaolínu) nebo dokonce se 100 % nestandardních plniv (Z1H s odpadním pískem z plavení kaolínu) přesahovaly hodnotu 50 MPa pevnosti v tlaku.

Při zkoušení odolnosti vůči střídavému působení kladných a záporných teplot byla zkušební tělesa vystavena celkem 100 zmrazovacím cyklům podle postupu uvedeného v ČSN 72 2452 [4]. Z výsledků, uvedených v tab. 4 a na obr. 2 vyplývá, že u vzorků vyrobených z některých modifikovaných záměstí s nestandardním kamenivem došlo k nárůstu hodnot pevností oproti stavu před zmrazováním.

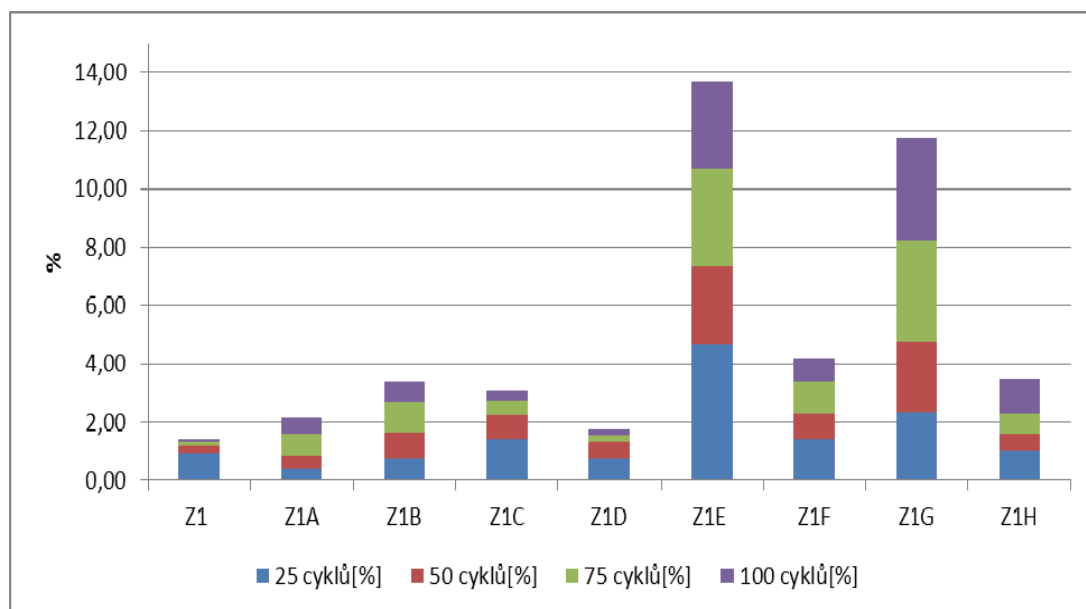
Tab. 4: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku po 100 zmrazovacích cyklech.

Vzorek	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v prostém tlaku [MPa]
Z1	11,5	97,4
Z1A	7,2	45,0
Z1B	9,5	61,1
Z1C	9,3	56,2
Z1D	9,3	72,2
Z1E	6,4	42,5
Z1F	0,8	24,3
Z1G	4,3	33,0
Z1H	7,8	57,1

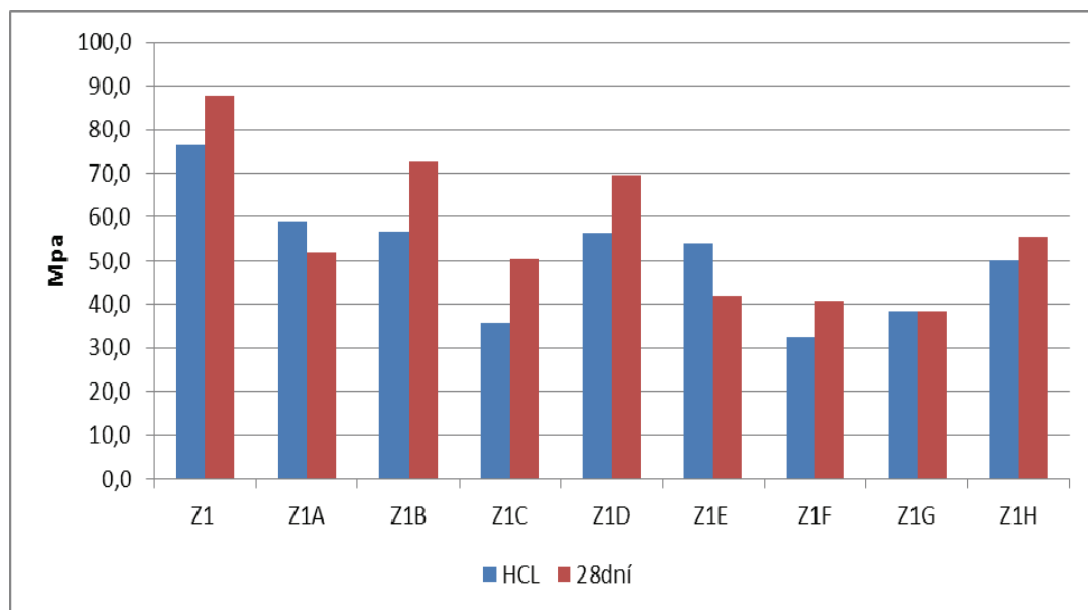


Obr. 2: Pevnost v tlaku po 100 zmrazovacích cyklech v porovnání s pevností po 28 dnech

Zkouška odolnosti testovaných záměstí vůči působení CHRL byla prováděna podle postupu uvedeného v ČSN 73 1326 [5]. Z výsledků na obr. 3 je zřejmé, že jak u referenční směsi, tak také u většiny směsí modifikovaných dosahovaly odpady po 100 zmrazovacích cyklech maximálně hodnoty 4 % původní hmotnosti zkušebního tělesa. Výjimku představují směsi Z1E (se 100% obsahem cihelného recyklátu) a Z1G (se 100 % obsahem výsivky), kde množství odpadu přesáhlo 10 %.

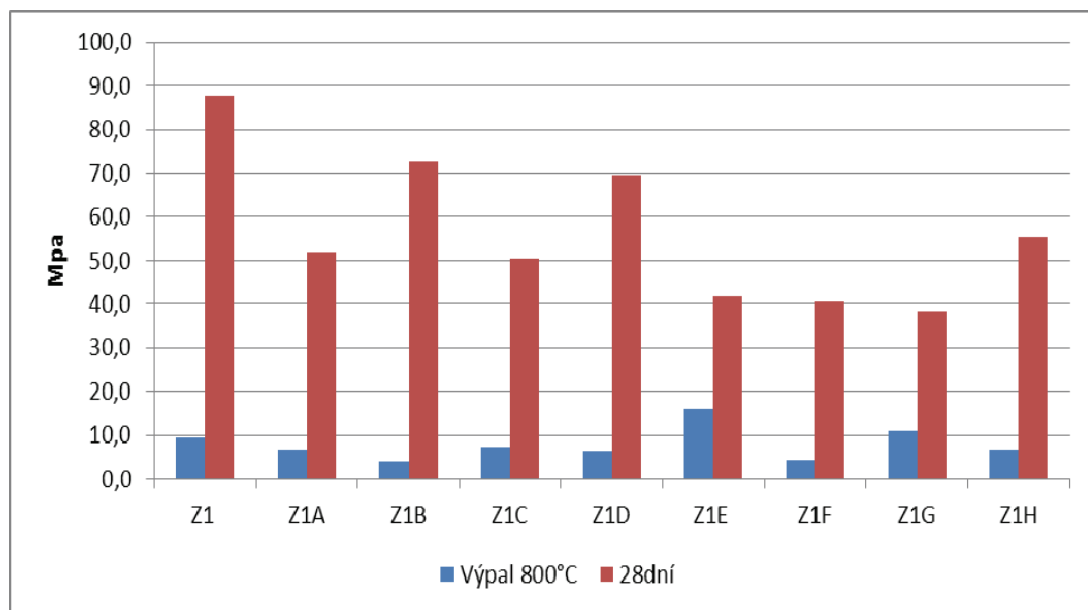


Obr. 3: Hodnoty hmotnosti odpadu z povrchu zkušebních těles v % hmotnosti původního vzorku po 25, 50, 75 a 100 cyklech zkoušky odolnosti vůči působení CHRL



Obr. 4: Pevnost v tlaku po vystavení 3% roztoku HCl v porovnání s pevností po 28 dnech

Obr. 4 prezentuje výsledky testování odolnosti vzorků z jednotlivých směsí vůči působení 3% roztoku HCl. Z výsledků je zřejmé, že u většiny hmot došlo k poklesu pevnosti oproti stavu před vystavením působení kyseliny, avšak v případě záměsí s obsahem 50 %, ale i 100 % cihelného recyklátu (směsi Z1A a Z1E) se pevnost naopak zvýšila. V případě směsi Z1E činilo toto zvýšení dokonce více než 20 % původní pevnosti.



Obr. 5: Pevnost v tlaku po vystavení teplotě 800°C v porovnání s pevností po 28 dnech

Na obr. 5 je zachyceno porovnání pevností v tlaku po 28 dnech u vzorků z jednotlivých směsí s pevnostmi po následném výpalu na 800°C s dobou izotermické výdrže 2 hodin. U všech testovaných vzorků došlo k poměrně výraznému poklesu pevností vlivem působení vysoké teploty. Nejnížší pokles byl, zaznamenan u vzorků směsi Z1E, která obsahovala 100 % cihelného recyklátu jako plniva. Tento fakt lze pravděpodobně přičíst skutečnosti, že cihla představuje materiál s určitou tepelnou historií a proto reakce hmoty s tímto plnivem bude jiná, než u ostatních plniv.

#### 4 HODNOCENÍ A ZÁVĚR

Výsledky experimentálního studia vybraných vlastností alkalicky aktivovaných materiálů s obsahem nestandardních kameniv naznačují, že použití plniv na bázi odpadních surovin nebo recyklátů je v těchto systémech velmi perspektivní. Podařilo se vytvořit směsi, které i přes obsah 50 %, popř. i 100 % alternativního kameniva z celkového objemu plniva, dosahují v zatvrdlém stavu pevností vyšších než 50 MPa, jsou velmi odolné vůči působení mrazu a CHRL a jejich mechanické vlastnosti nejsou podstatným způsobem snižovány ani působením kyselého prostředí.

Význam zjištěných výsledků a závěrů této fáze laboratorních výzkumů je obzvláště důležitý i z hlediska skutečnosti, že některá testovaná plniva (např. kyselé písky z plavení kaolínu) nejsou v žádném případě použitelná v technologii betonu a maltovin na bázi portlandského cementu.

#### PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Grantové agentury ČR, projekt GAČR ev. č. 106/09/0588 „Vliv fázového složení a mikrostruktury na funkční vlastnosti geopolymerních systémů z technogenních pucolánů“.

#### LITERATURA

- [1] ČSN EN 1015-2 – *Zkušební metody malt pro zdivo* - Část 2: Odběr základních vzorků malt a příprava zkušebních malt, Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [2] ČSN EN 1015-3 – *Zkušební metody malt pro zdivo* - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku), Český normalizační institut, Praha, 1999.
- [3] ČSN EN 1015-11 – *Zkušební metody malt pro zdivo* - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku, Český normalizační institut, Praha, 2000.
- [4] ČSN 72 2452 – *Zkouška mrazuvzdornosti malty*, Český normalizační institut, Praha, 1968.
- [5] ČSN 73 1326 – Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám, Český normalizační institut, Praha, 1985.
- [6] Davidovits, J., *Geopolymer chemistry and applications*, Geopolymer Institute, 2008.
- [7] Shi, C., Roy, D., Krivenko, P., *Alkali-activated cements and concretes*, Spon press, 2006.

#### Oponentní posudek vypracovali:

Prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc., Ústav chemie, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně.

Ing. Vojtěch Václavík, Ph.D., Institut environmentálního inženýrství, Hornicko-geologická fakulta, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.